反刍动物对磷的利用

刘　阳[1]　杨昕涧[1]　杜红方[1]　陈书琴[1]　王永华[2]　解祥学[1—]

（1.广东溢多利生物科技股份有限公司，珠海　519060；2.华南理工大学食品与科学工程学院，广州　510641）

摘　要：磷是参与动物机体多种生物学反应的必需元素之一，但畜禽养殖，尤其是反刍动物养殖过程中磷排泄带来的水体污染等环境问题已经成为业界关注的焦点，因此如何提高磷的利用率、减少磷排泄是行业亟待解决的问题。本文总结了反刍动物磷利用的相关研究进展，并结合其代谢特点归纳了提高磷利用率的措施，提出了下一步研究的方向。

关键词：反刍动物；植酸磷；生产性能；消化率；磷利用率

中图分类号：S823；S826

磷是动物机体必需的常量矿物质元素之一，在骨骼发育、细胞内能量传递、血液酸碱平衡以及酶促反应等过程中均发挥重要作用。磷在反刍动物体内和瘤胃微生物中发挥着比其他矿物质更为重要的生物学功能，磷摄入不足会影响机体的正常代谢，造成繁殖性能和生产性能的下降，但磷饲喂量过高则不仅浪费矿物质资源，更会引起土壤、水体的富营养化等环境问题，从而带来经济损失，加重养殖户的负担。畜禽养殖过程中大量的磷随粪便排泄，例如泌乳奶牛磷摄入量的58%会经由粪便排出[1]，在美国，流入水体中磷的33%都由畜牧业造成[2]，而反刍动物磷排泄则占整个畜禽养殖的60%左右[3]。当前国家不断出台措施加强畜禽污染管控，严格限制粪污排放，而且在世界范围内矿物质磷资源可能都会因为缺乏而价格上涨[4]。因此，如何在保证正常生产性能的条件下减少饲粮磷添加量，提高反刍动物磷利用率，最大限度地减少磷排泄已经成为行业必须面对且迫切需要解决的问题。本文主要从反刍动物中磷的消化代谢特点、需要量、对生产性能的影响等方面进行总结，探讨提高磷利用率的措施，从而为生产中减少磷排泄提供指导。

1　磷的消化代谢特点

进入消化道内的总磷由内源磷和外源磷 2 部分组成，外源部分来源于饲粮，内源部分则主要来源于唾液。反刍动物前胃对磷酸根离子吸收率较低，磷吸收的主要部位为小肠前段。不同于单胃动物小肠中的磷吸收有维生素 D 依赖的主动运输和被动吸收 2 种方式，反刍动物磷吸收的主要方式目前仍不清楚，某种载体的介导会降低高含量下磷的吸收效率[5]，这可能是补饲磷会导致其利用率下降的原因所在。许多营养因素都能影响磷的利用，例如饲粮磷含量、总磷含量、磷源、牧草与谷物的比例、饲粮钙含量等，动物年龄、不同生理阶段以及内分泌激素等也会影响磷的消化代谢，一些研究者利用代谢模型来预测磷的吸收和排泄，Hill 等[6]用一系列代谢参数构建了泌乳奶牛磷消化的动态模型，假定磷摄入量为 75 g/d 时其

收稿日期：2018-02-08
基金项目：农业部公益性行业（农业）专项（201503134）
作者简介：刘　阳（1992-），男，陕西宝鸡人，助理工程师，硕士，从事反刍动物营养研究。E-mail：929333152@qq.com
一通信作者：解祥学，高级工程师，E-mail：　282935225@qq.com

全消化道消化率为38%，其中65%会经唾液循环再进入瘤胃中，30%用于乳的合成；植酸磷在瘤胃内消化率为74%，但在消化道后段没有吸收，无机磷和有机磷在消化道后段的消化率分别为48%和89%。常用的表示饲粮有效磷的指标有磷表观消化率和磷相对生物学价值，但只有磷真消化率才能最准确地反映其消化吸收情况。目前的研究中仍然缺乏有效磷利用的标准评价体系，不同因素的影响也难以统一和量化，所以针对于此的研究应该成为重点，而植酸磷在反刍动物饲粮中占比较大且在减少磷排泄方面具有应用潜力，因此研究植酸磷的消化代谢也就尤为重要。

1.1 植酸磷的瘤胃内消化

植酸酶作为添加剂已经在单胃动物中广泛使用，而反刍动物因其瘤胃微生物能产生植酸酶，进而可以有效利用饲粮中的植酸磷。植酸即肌醇六磷酸（myo-inositol hexakisphosphate,IP-6），是谷物饲粮及其副产物中磷的主要储存形式。反刍动物饲粮中植酸磷占总磷比例很高。植酸在瘤胃微生物合成的植酸酶作用下能水解为低磷酸化肌醇[肌醇一磷酸（IP-1）、肌醇二磷酸（IP-2）、肌醇三磷酸（IP-3）、肌醇四磷酸（IP-4）、肌醇五磷酸（IP-5）]和磷酸基团，并在小肠中进一步被消化和吸收。Ray 等[7]通过测定粪中植酸的排泄发现奶牛对植酸的消化率高达93%~99%，且给奶牛补饲植酸磷不会影响其在瘤胃中的水解，说明增加植酸磷摄入并不会使瘤胃内植酸酶活性趋于饱和；该研究还表明，磷源对无机磷的净消化以及植酸磷在大肠中的消化率也无显著影响，说明相对于饲粮不同磷源，总磷含量的改变对磷排泄的影响更大。

不同饲料原料中植酸的水解特性各不相同[8]，结合蛋白质等其他营养物质的能力也不同，这可能是因为植物种子中植酸的储存形式与位点不同[9]，油籽中的植酸主要位于糊粉层，大豆和玉米分别位于蛋白体和胚芽中，所以油籽和谷物副产品中植酸磷含量普遍较高，牧草内植酸含量较低，只存在于苜蓿和一些稻科植物中。热处理、甲醛处理等饲料加工方法以及饲粮组分等均会影响植酸的消化利用，增加饲粮中植酸含量可以促进其在奶牛瘤胃中以及全消化道的降解，但补饲磷的结果与其相反[10]，这与 Haese 等[11]在体外试验中得出的研究结果一致。

Haese 等[11]发现不同饲料原料间植酸的可降解性存在显著差异，尽管高含量的植酸能提高其在瘤胃中的消化率，但油籽类原料尤其是菜籽粕在瘤胃内的降解速率要低于谷物原料。因此当饲粮中含有油籽粕类原料时，可以通过提高植酸含量来促进其在瘤胃内的降解，尤其对于高产奶牛，干物质采食量（DMI）增加，饲粮摄入后在瘤胃内停留时间减少，且此时瘤胃发酵条件欠佳，这都会限制植酸的降解[12]。饲粮组成还会影响瘤胃内植酸酶的活性[11]，因此不同微生物及其所产生植酸酶的特征需要进一步研究。

NRC（2001）规定牧草和精料中磷的消化率分别为64%和70%。Cherry 等[13]利用尼龙袋技术来测定牧草中磷在荷斯坦奶公犊消化道中降解的情况，结果表明，青贮玉米、苜蓿干草以及狗牙根干草中磷的全消化道消化率分别为90.6%、93.7%和83.8%。除此之外，牧草

的成熟期对磷的降解也有显著影响，例如头次收割后 35 d 收割的牧草与头次收割后 14 d 的相比，磷的全消化道消化率减少了 5.4%[14]。Wu[15]还发现用豆皮替代苜蓿干草能通过提高磷的可消化性来减少磷排泄，同时不会对奶牛生产性能产生影响，说明使用易消化的纤维源能在满足磷需要量条件下降低饲粮中磷的含量，进而减少磷排泄。

以上研究结果提示，应该精确掌握不同饲料原料中磷在消化道中的释放量，并在设计饲粮配方时充分考虑这些原料中磷的可消化性。

1.2　植酸磷的瘤胃后消化

通过瘤胃后的植酸盐还能进行进一步的水解，但这方面的研究较少。单胃和反刍动物吸收磷的主要部位都是小肠[16]，但植酸磷在奶牛小肠中的消化率很低[17]，切碎的饲草则会影响磷的流动和吸收，增加小肠中磷的通过量，进而增加磷排泄[12]。Riojas-McCollister 等[14]观察到苜蓿等牧草在瘤胃后消化道有明显的磷释放。不同原料中磷在消化道中主要降解位置可能有差异。Cherry 等[13]发现不同消化道区段对饲料原料中磷的降解有很大差别，一些豆科牧草中磷的主要消化部位位于肠道，这可能与其含有缩合单宁有关，因为单宁与磷的结合会减缓其在瘤胃内的降解。大肠微生物也可以产生植酸酶来催化少量植酸盐的水解，Ray 等[7]还观察到了大肠内磷的吸收，16%经回肠流出的植酸盐能在大肠内被降解，但这不受饲粮植酸盐含量的影响，瘤胃和大肠微生物植酸酶的底物偏好可能不同，这也可以弥补前段肠道对于植酸盐降解以及磷吸收的不足，关于植酸盐降解的位点及其在大肠内的消化吸收还需要进一步的研究。

由于在 DMI、饲粮成分以及采样和样品分析方法等方面的差异，所以通过对比不同的研究来确定影响植酸降解的因素比较困难，而且体外试验中观察到的影响因素并不一定适用于体内试验。目前的研究中主要还是缺乏有效磷利用的标准评价体系，下一步研究应该重点关注以下几个方面：1）继续从定量的角度来阐述磷在消化道内的吸收以及内源磷的分泌，完善磷消化代谢的动态模型；2）研究不同饲料原料中磷的降解特性，掌握其真实消化率的数据，为饲粮配制提供依据；3）探索微生物区系对不同类型植酸酶产量以及植酸磷消化的影响，并研究此条件下瘤胃微生物的适宜磷含量。

2　反刍动物磷需要量

NRC（2001）推荐奶牛生产 25~55 kg 牛奶时所需的饲粮磷含量范围为 3.20~3.80 g/kg DM，每生产 1 kg 乳脂率为 4.5%的牛奶时所需磷为 3.2 g。刘春生[18]报道这一推荐值对于泌乳奶牛是足够的，且经直接测定奶中磷含量可得用于泌乳的磷需要量为 0.9 g/kg 牛奶，而磷含量高于 3.8 g/kg DM 时对提高奶牛繁殖性能和生产性能没有显著影响。虽然一些研究表明，饲喂磷含量高于 NRC（2001）推荐值时对生产性能没有显著影响[19]，但磷的实际饲喂量仍然超过 NRC（2001）的 30%[20]，所以目前普遍认为生产中磷的供给是过量的。Geisert 等[21]发现给青年母牛饲喂含磷量为 0.10%的饲粮会导致磷的缺乏，而其适宜磷需要量为 0.10%~0.17%，且这一范围的添加量还能减少磷排泄，所以在谷物型基础饲粮上补饲磷是没

有必要的。

Bjelland 等[22]认为 0.20%~0.35%的饲粮磷含量即可满足后备奶牛的营养需要，Kebreab 等[23]关于奶牛饲喂管理的研究也认为，导致磷排泄污染环境的首要原因就是磷饲喂量过高。我国《肉羊饲养标准》（NY/T 816—2004）推荐育成期山羊饲粮磷含量为 0.35%，王建华等[24]研究表明，饲粮磷含量为 0.29%~0.41%时可满足崂山奶山羊的营养需要，磷含量为 0.59%时则会增加磷排泄，降低磷表观消化率。

以上研究大都建议适当降低反刍动物饲粮中磷含量，但目前磷的适宜添加量都是根据生殖性能、产奶量以及骨骼稳定性等方面指标研究得出[25]。目前，减少反刍动物饲粮中磷含量，从而减少粪磷的排泄受到鼓励。Macrae 等[26]观察到，超过 10%的泌乳早期奶牛伴随有低磷血症，这可能是由泌乳或者产奶量的增加导致磷需要量的增加，而临产奶牛饲粮磷含量偏低或泌乳早期奶牛采食量处于最低点引起的；Knowlton 等[27]也认为低磷饲喂的泌乳早期奶牛需要动员骨骼中的磷来满足维持和生产需要；然而，Eisenberg 等[28]给奶牛饲喂低磷饲粮（0.2%）后发现，饲粮磷含量下降不会通过损伤细胞内免疫功能来影响奶牛健康。因此，在研究反刍动物磷需要量时，除了繁殖性能和生产性能外，还应该关注其对机体其他方面代谢的影响。

3 磷含量对生产性能、营养物质消化率以及磷排泄的影响

通常认为总磷摄入量是决定奶牛磷排泄量的主要因素，很多研究也已经表明二者之间存在正相关关系[29]，而给奶牛饲喂低磷饲粮则可以显著减少磷排泄量[30]。肠道磷吸收以及骨骼内磷的沉积与重吸收是维持机体适宜血液磷含量的主要调节因素，而骨磷平衡又与磷摄入量以及瘤胃内植酸酶活性有关，因此将磷摄入量降低到推荐值以下可能并不会提高植酸磷的消化率。

饲粮磷含量不影响泌乳奶牛 DM 的表观消化率，磷的表观消化率范围为 36.61%~38.76%[31]。赵恒聚等[32]发现饲粮磷含量为 0.32%时不影响荷斯坦奶牛生产性能，但磷表观消化率随磷摄入量的增加极显著降低，降低饲粮磷含量也能极显著降低磷排泄量[33]，对中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维表观消化率也有显著影响[34]。在热应激条件下，饲粮磷含量为 0.29%时荷斯坦奶牛的产奶量和乳脂率均显著低于饲粮磷含量为为 0.35%和 0.42%时，机体的钙、磷代谢也受到了影响[35]。Puggaard 等[36]也发现饲粮磷含量从 3.4 g/kg DM 降至 2.3 g/kg DM 时会显著降低泌乳早期奶牛 DMI、产奶量和乳蛋白产量。

如上所述，已经有不少关于反刍动物磷需要量、饲粮磷含量与营养物质消化率关系、饲粮磷含量影响生产性能的研究，总体来看普遍倾向于要适当降低反刍动物饲粮中磷含量，但各研究结果不尽一致，这可能是因为磷源不同，例如添加磷酸氢钙和麸皮都可以快速提高饲粮磷含量，但磷源的不同对试验结果的影响却没有被考虑在内。除了试验动物、饲粮不同等因素外，主要还是因为有效磷评价体系不同，比如磷表观消化率和磷相对生物学价值都不能反映磷吸收利用的真实情况，而且目前缺乏对饲料原料中有效磷的准确评定，这也是导致过

量磷排泄的根本原因，下一步的研究应该主要从这方面入手。

4 提高磷利用率的措施

4.1 外源植酸酶的添加

植物性内源植酸酶在瘤胃内的植酸盐降解中只发挥很小的作用，因此通过增加含有高内源性植酸酶的精料的比例来促进植酸的降解并不可行[11]，外源植酸酶是一种广泛使用的单胃动物饲料添加剂，可以通过细菌、酵母、黑曲霉等多种形式的微生物获得[37]，目前很少见到其适用于反刍动物的商业产品。Knowlton 等[38]发现给泌乳奶牛补充外源植酸酶可以减少其粪磷的排泄；Jarrett 等[12]虽然观察到了相反的结果，但其研究表明植酸酶可以将植酸磷的消化率从 96.7%提高到 97.6%，且植酸酶在全混合日粮（TMR）中就可以快速地将植酸磷降解为无机磷。Kincaid 等[39]通过给奶牛补饲植酸酶，将植酸磷的全消化道消化率从 80%提高到了 85%。这些结果提示，补饲植酸酶或许可以在降低饲粮总磷含量的条件下促进植酸磷的降解，进而提高磷的消化率、减少磷排泄，但外源植酸酶在反刍动物机体内作用的有效性仍然需要进一步的研究。

4.2 饲料加工技术的优化

如前所述，植酸盐的可消化性与其在植物饲料中的储存形式与分布有关，且植酸盐主要位于糊粉层和外麸中，因此通过机械加工来使这一部分分离能有效减少植酸磷含量[40]，但研磨等加工方法会导致营养物质的损失，且反刍动物饲粮中就含有谷物副产品。研究显示，发酵可以有效降解植酸磷[41]，因为乳酸菌、酵母等均能产生植酸酶[42]，发酵后微生物产酸使饲料 pH 降低也有利于植物内源性植酸酶发挥作用[43]。使用热处理、甲醛等化学剂处理饲料会降低其在瘤胃中的溶解度，但用乳酸处理大麦不仅增强了淀粉和纤维的消化，还催化了植酸盐的水解，促进了磷的消化，利用乳酸、柠檬酸等有机酸处理后的大麦还能促进反刍动物对 NDF 的消化，这可能与其对瘤胃内细菌菌群的影响有关。种子萌发后植酸盐含量会迅速降低，且植酸酶活性增加[44]，但在反刍动物饲粮中应用发芽谷物对其生长、生产性能等的影响还有待于进一步研究。此外，还可以利用植酸盐的水溶性来通过浸泡去除部分植酸盐，浸泡条件也有利于植酸酶活性的提高，有效降解植酸盐，但该过程也会造成其他营养成分的损失。以上方法都可以在一定程度上减少植酸盐含量和增强植酸酶活性，但使用时需综合考虑对其他营养物质消化的影响。

4.3 饲粮配方的优化

磷的平衡调节机制主要通过唾液磷的再循环和内源磷的排出来实现，二者与反刍动物磷的吸收量密切相关[45]。钙、磷能促进反刍动物的生长发育、维持正常的免疫功能、有效提高生产性能[46]。较早的研究认为，钙、磷比为（1~7）:1 比较适合。但钙在瘤胃中会与植酸盐结合形成难以利用的植酸钙，不仅抑制植酸酶的水解作用，还会降低钙的利用率，过量的钙和其他金属离子如铁、镁、铝等都能与磷酸结合生成不溶性盐类而阻碍磷的吸收。反刍动物缺乏排出多余钙的机制，而且饲粮中钙比例也容易偏高，因此适宜的钙磷比及钙含量对磷利

用非常重要。维生素 D 是维持细胞外液磷生理含量的重要因子，1，25 二羟基维生素 D 能促进肠道对磷的吸收，血浆磷含量过低时会刺激其产生，低含量磷的吸收也要依靠维生素 D 的主动转运来实现，所以配制低磷饲粮时要尤其注意维生素 D 的补充。此外，如前文所述，精料原料中磷的可利用性需要重点考虑，但需要有基础研究的支撑。

5 小 结

总体而言，目前可以适当降低反刍动物生产中磷的实际添加量，以此来有效减少磷排泄。但关于不同饲料原料中磷的真实可利用性的研究仍然较少，标准化的评价磷消化率的方法也需要建立，这样才能有效比较不同的研究结果，优化磷在机体内消化吸收的动态模型，进而在饲粮设计中平衡各项因素，提高磷的消化率。

参考文献：

[1] AlVAREZ-FUENTES G,APPUHAMY J A D R N,KEBREAB E.Prediction of phosphorus output in manure and milk by lactating dairy cows[J].Journal of Dairy Science,2016,99(1):771–782.

[2] FAO.Livestock’s long shadow:environmental issues and options[M].[S.l.]:Food and Agriculture Organization of the United Nations FAO,2006.

[3] TAMMINGA S.Nutrition management of dairy cows as a contribution to pollution control[J].Journal of Dairy Science,1992,75(1):345–357.

[4] CORDELL D,DRANGERT J O,WHITE S.The story of phosphorus:global food security and food for thought[J].Global Environmental Change,2009,19(2):292–305.

[5] 曹满湖.日粮磷水平和 VD3 对 Na+/Pi-Ⅱb mRNA 表达和磷吸收的影响[D].博士学位论文.长沙：湖南农业大学,2010.

[6] HILL S R,KNOWLTON K F,KEBREAB E,et al.A model of phosphorus digestion and metabolism in the lactating dairy cow[J].Journal of Dairy Science,2008,91(5):2021–2032.

[7] RAY P P,JARRETT J,KNOWLTON K F.Effect of dietary phytate on phosphorus digestibility in dairy cows[J].Journal of Dairy Science,2013,96(2):1156–1163.

[8] BRASK-PEDERSEN D N,GLITSØ L V,SKOV L K,et al.Effect of exogenous phytase on feed inositol phosphate hydrolysis in an *in vitro* rumen fluid buffer system[J].Journal of Dairy Science,2011,94(2):951–959.

[9] HAESE E,LENGOWSKI M,GRÄTER E,et al.Ruminal phytate degradation of maize grain and rapeseed meal *in vitro* and as affected by phytate content in donor animal diets and inorganic phosphorus in the buffer[J].Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition,2017,101(5):868–880.

[10] HAESE E,MÜLLER K,STEINGASS H,et al.Effects of mineral and rapeseed phosphorus supplementation on phytate degradation in dairy cows[J].Archives of Animal Nutrition,2014,68(6):478–491.

[11] HAESE E,MÖHRING J,STEINGASS H,et al.Effect of dietary mineral phosphorus and phytate on *in situ* ruminal phytate disappearance from different concentrates in dairy

cows[J].Journal of Dairy Science,2017,100(5):3672–3684.

[12] JARRETT J P,WILSON J W,RAY P P,et al.The effects of forage particle length and exogenous phytase inclusion on phosphorus digestion and absorption in lactating cows[J].Journal of Dairy Science,2014,97(1):411–418.

[13] CHERRY N M,LAMBERT B D,MUIR J P.Ruminal and total tract phosphorus release from feedstuffs in cattle measured using the mobile nylon bag technique[J].Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition,2010,94(5):665–669.

[14] RIOJAS - MCCOLLISTER A V,LAMBERT B D,MUIR J P.Maturity of coastal bermudagrass and alfalfa affects ruminal *in situ* and total tract dry matter and phosphorus disappearance in cannulated steers[J].Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition,2011,95(2):267–272.

[15] WU Z.Utilization of phosphorus in lactating cows fed varying amounts of phosphorus and sources of fiber[J].Journal of Dairy Science,2005,88(8):2850–2859.

[16] FENG X,RONK E,HANIGAN M D,et al.Effect of dietary phosphorus on intestinal phosphorus absorption in growing Holstein steers[J].Journal of Dairy Science,2015,98(5):3410–3416.

[17] BRASK-PEDERSEN D N,GLITSØ L V,SKOV L K,et al.Effect of exogenous phytase on degradation of inositol phosphate in dairy cows[J].Journal of Dairy Science,2013,96(3):1691–1700.

[18] Harland.反刍动物磷需要量的重估 环境保护要求饲喂给奶牛低于推荐量的低磷日粮[J].刘春生,译.中国奶牛,2004(1):31–33.

[19] REID M,O’DONOVAN M,ELLIOTT C T,et al.The effect of dietary crude protein and phosphorus on grass-fed dairy cow production,nutrient status,and milk heat stability[J].Journal of Dairy Science,2015,98(1):517–531.

[20] DOU Z,FERGUSON J D,FIORINI J,et al.Phosphorus feeding levels and critical control points on dairy farms[J].Journal of Dairy Science,2003,86(11):3787–3795.

[21] GEISERT B G,ERICKSON G E,KLOPFENSTEIN T J,et al.Phosphorus requirement and excretion of finishing beef cattle fed different concentrations of phosphorus[J].Journal of Animal Science,2010,88(7):2393–2402.

[22] BJELLAND D W,WEIGEL K A,HOFFMAN P C,et al.The effect of feeding dairy heifers diets with and without supplemental phosphorus on growth,reproductive efficiency,health,and lactation performance[J].Journal of Dairy Science,2011,94(12):6233–6242.

[23] KEBREAB E,HANSEN A V,LEYTEM A B.Feed management practices to reduce manure phosphorus excretion in dairy cattle[J].Advances in Animal Biosciences,2013,4(Suppl.1):37–41.

[24] 王建华,戈新,汪文鑫,等.磷在崂山奶山羊体内消化、分配和利用的研究[J].饲料研究,2007(12):1–4.

[25] VALK H,ŠEBEK L B J,BEYNEN A C.Influence of phosphorus intake on excretion and blood plasma and saliva concentrations of phosphorus in dairy cows[J].Journal of Dairy

Science,2002,85(10):2642–2649.
[26] MACRAE A I,WHITAKER D A,BURROUGH E,et al.Use of metabolic profiles for the assessment of dietary adequacy in UK dairy herds[J].Veterinary Record,2006,159(20):655–661.
[27] KNOWLTON K F,HERBEIN J H.Phosphorus partitioning during early lactation in dairy cows fed diets varying in phosphorus content[J].Journal of Dairy Science,2002,85(5):1227–1236.
[28] EISENBERG S W F,RAVESLOOT L,KOETS A P,et al.Influence of feeding a low-phosphorus diet on leucocyte function in dairy cows[J].Journal of Dairy Science,2014,97(8):5176–5184.
[29] EKELUND A,SPÖRNDLY R,VALK H,et al.Effects of varying monosodium phosphate intake on phosphorus excretion in dairy cows[J].Livestock Production Science,2005,96(2/3):301–306.
[30] FERRIS C P,MCCOY M A,PATTERSON D C,et al.Effect of offering dairy cows diets differing in phosphorus concentration over four successive lactations:2.Health,fertility,bone phosphorus reserves and nutrient utilisation[J].Animal,2010,4(4):560–571.
[31] 张峰,邱伟,刘小静,等.日粮磷水平对泌乳奶牛生产性能及磷表观消化率的影响[J].天津农业科学,2013,19(3):38–42.
[32] 赵恒聚,高艳霞,李秋凤,等.日粮磷水平对泌乳奶牛生产性能及磷排放的影响[J].中国农业科学,2010,44(22):4687–4693.
[33] 孙国强,王书芝,吕永艳,等.饲粮磷含量对 11~15 月龄青年奶牛生长性能、血液指标和磷排泄的影响[J].动物营养学报,2015,27(12):3912–3919.
[34] 许建海,张微,黄洁,等.饲粮磷水平对西门塔尔杂交后备母牛营养物质表观消化率的影响[J].动物营养学报,2011,23(4):589–596.
[35] 张玉诚,薛白,肖俊,等.饲粮磷水平对热应激奶牛生产性能和血液指标的影响[J].动物营养学报,2015,27(3):749–755.
[36] PUGGAARD L,LUND P,LIESEGANG A,et al.Long term effect of reduced dietary phosphorus on feed intake and milk yield in dry and lactating dairy cows[J].Livestock Science,2014,159:18–28.
[37] HUMER E,SCHWARZ C,SCHEDLE K.Phytate in pig and poultry nutrition[J].Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition,2015,99(4):605–625.
[38] KNOWLTON K F,TAYLOR M S,HILL S R,et al.Manure nutrient excretion by lactating cows fed exogenous phytase and cellulase[J].Journal of Dairy Science,2007,90(9):4356–4360.
[39] KINCAID R L,GARIKIPATI D K,NENNICH T D,et al.Effect of grain source and exogenous phytase on phosphorus digestibility in dairy cows[J].Journal of Dairy Science,2005,88(8):2893–2902.
[40] SCHLEMMER U,FRØLICH W,PRIETO R M,et al.Phytate in foods and significance for humans:food sources,intake,processing,bioavailability,protective role and analysis[J].Molecular Nutrition & Food Research,2009,53(Suppl.2):S330–S375.
[41] JAKOBSEN G V,JENSEN B B,BACH KNUDSEN K E,et al.Fermentation and addition of

enzymes to a diet based on high-moisture corn,rapeseed cake,and peas improve digestibility of nonstarch polysaccharides,crude protein,and phosphorus in pigs[J].Journal of Animal Science,2015,93(5):2234–2245.

[42] LIU N,RU Y J,WANG J P,et al.Effect of dietary sodium phytate and microbial phytase on the lipase activity and lipid metabolism of broiler chickens[J].British Journal of Nutrition,2010,103(6):862–868.

[43] LEENHARDT F,LEVRAT-VERNY M A,CHANLIAUD E,et al.Moderate decrease of pH by sourdough fermentation is sufficient to reduce phytate content of whole wheat flour through endogenous phytase activity[J].Journal of Agricultural and Food Chemistry,2005,53(1):98–102.

[44] SOKRAB A M,AHMED I A M,BABIKER E E.Effect of fermentation on antinutrients,and total and extractable minerals of high and low phytate corn genotypes[J].Journal of Food Science and Technology,2014,51(10):2608–2615.

[45] 颜琼娴,谭支良.反刍动物内源磷排泄量及磷真消化率的研究进展[J].华北农学报,2009,24(增刊):231–235.

[46] 沈维军,王加启,卜登攀,等.2008–2009 年反刍动物营养研究进展Ⅶ.矿物质元素[J].中国畜牧兽医,2010,37(5):5–9.

Phosphorus Utilization in Ruminants

LIU Yang[1] YANG Xinjian[1] DU Hongfang[1] CHEN Shuqin[1] WANG Yonghua[2] XIE Xiangxue[1]

(1. *Guangdong VTR Bio-Tech Co., Ltd., Zhuhai* 519060, *China; 2.School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou* 510641, *China*)

Abstract: Phosphorus (P) is one of the essential elements for animals, which participles in various biochemical processes in animals. Environmental concerns like water pollution by P from livestock farms, especially in ruminants, is a growing concern. It is a problem needed to be solved that maximize P efficiency and reduce P emission. This article summarized the studies relevant to P utilization in ruminants, and concluded measures to increase P utilization rate based on metabolism characteristics of ruminants, then put forward to the following research direction.

Key words: ruminant; phytate phosphorus; performance; digestibility; phosphorus utilization rate

*Corresponding author, senior engineer, E-mail: 282935225@qq.com (责任编辑 王智航)